

## 굴착영향을 고려한 지하공동의 구조거동연구

### A Study on the Structural Behavior of Underground Openings Considering the Effect of Excavation

최 규 섭\*      김 대 홍\*\*  
CHOI, KYU-SUP      KIM, DAE-HONG

#### ABSTRACT

In order to design and construct a safe and economic underground structure, it is essential to understand the structural behavior of underground openings considering the effect of the sequential excavation. Therefore, this paper includes the study of initial stress distribution before excavation and stress redistribution due to the sequential excavation. And discussion on numerical simulation techniques for the sequential excavation is also included. Then, the underground structure is analyzed using the finite element and distinct element methods of analysis considering the effect of the sequential excavation. Based on the results of the analysis, the followings are discussed: shape of the openings, effect and timing of structural reinforcements, methods and sequence of excavation.

#### 1. 서 론

지하원자력발전소, 방사성폐기물처분장, 지하비축시설 등의 건설을 목적으로 지하암반공동을 굴착할 경우 건설기간동안은 물론 건설 후 운영기간에도 공동주변의 공학적 안전성은 필수적으로 확보되어야 한다. 이를 위해서는 계획단계에서 충분한 지질조사가 선행되어야 하며, 지질조건과 구조물의 목적에 적합한 공동의 단면형상과 굴착방법 등이 선정되어야 할 것이다.

암반공동의 구조거동은 굴착전 암반체내에 존재하고 있었던 초기응력의 크기와 불연속면 등과 같은 지질분포 및 특성, 그리고 공동의 기하형상에 가장 큰 영향을 받는다. 공동굴착시 구조체의 일부분이 제거되기 때문에 구조물의 기하형상은 굴착단계별로 변화하게 되며, 이때 평형상태이던 초기응력은 굴착된 공동주변에서 재분배된다. 따라서 지하암반공동굴착에 대한 수치모형화작업은 굴착전 암반체에서의 응력상태를 파악하기 위한 초기과정(Initial Phase), 공동굴착과 보강과정을 포함하는 건설과정(Construction Phase), 그리고 지하구조물의 완공 후 시설의 운영과정(Operation Phase) 등의 3단계로 나누어 수행하는 것이 바람직하다.

초기과정에서는 지질조사로부터 구한 지질분포와 특성을 입력으로 하여 굴착전 암반내의 초기응력을 산정하는 작업으로서, 이는 많은 단순화가정을 도입하기 때문에 실측치와 비교를 통한 검증작업을 필요로 한다.

건설과정에서는 굴착시 초기응력을 받고 있던 구조체의 일부분을 제거함으로써 발생하는 변위, 변형도, 응력 등의 변화를 평가하는 작업과 이완영역의 보강시 거동변화를 평가하는 작업을 포함한다. 건설과정시 굴착으로 인한 거동은 굴착방법과 순서, 보강방법과 시기 등에 따라서 많은 영향을 받게 될 것이다.

운영과정에서는 공동의 최종굴착이후 안전성에 영향을 미치는 요소에 대한 거동을 검토하는 작업으로서, 지진과 장기적인 지하수침투로 인한 거동변화 등을 예로 들 수 있다.

과거에는 지하구조물의 구조해석시 공동굴착전 암반체내에 작용하고 있는 초기응력과 공동굴착의 단계별영향을 고려하지 않았기 때문에 해석결과에 많은 문제점을 보여주었다. 또한 Rockbolt와 Shotcrete같은 보강재를 사용하여 공동굴착에 대한 보강효과를 해석과정에서 반영할 경우, 응력이완이 전혀 진행되지 않은 상태 또는 완전히 끝난 상태에서만 고려하였기 때문에 실제와 상당히 다른 해석결과를 보여주었다[1].

본 연구에서는 이러한 문제의 해결을 위하여 초기응력장내에 공동을 굴착하였을 경우 굴착의 전과정에서 발생하는 공동주변에서의 거동변화를 검토하였다. 이를 위하여 굴착전 지하암반내에 존재하는 초기응력과 굴착후 공동주변에서의 응력재분배에 대한 이론적인 내

\* 정희원, 중앙대학교 토목공학과 박사과정  
\*\* 정희원, 한국원자력연구소 구조설계실  
선임연구원

응과 공동굴착에 대한 수치모형화방법을 검토하였다. 이러한 내용을 토대로 암반공동의 굴착에 따른 공동주변의 거동변화를 검토하기 위하여 지하암반체에 대한 대표적 전산해석방법인 유한요소법과 개별요소법에 의한 수치해석을 각각 수행하였다. 해석결과를 분석한 후 굴착단면형태, 굴착방법 및 순서, 보강방법과 시기 등에 대한 장단점과 다공동굴착시 굴착순서의 고려유무에 따른 거동변화 등을 비교 검토하였다.

## 2. 공동주변에서의 응력변화

### (1) 굴착전 지하암반의 초기응력

암반의 초기응력은 교란되지 않은 현장암반의 응력 또는 인위적인 변형이 가해지기 이전의 자연상태에서 암반내에 존재하는 응력[2]으로 정의하고 있다.

초기응력은 암석의 생성과정과 생성이후의 모든 지질작용, 지각운동, 암석의 변형특성뿐만 아니라 암반내의 수분, 지열, 그리고 인접암석과의 결속력 등에 따라서 그 크기와 방향이 달라진다. 따라서 초기응력을 정확히 평가하기 위해서는 현장시험으로부터 직접 측정하여야 한다. 현재 세계 여러지역을 대상으로 많은 학자들이 현장시험을 통하여 제안한 연직깊이별 초기응력분포는 그림 1과 같다.

그림 1(a)에서 초기응력의 연직성분은 대체적으로 상재된 암반의 중량에 비례함을 알 수 있다. 또한 그림 1(b)로부터 초기응력의 수평성분은 대체적으로 약 300m 이내의 깊이에서는 연직성분보다 더 큰 값을 나타내고, 약 1,000m 깊이에서는 연직성분과 서로 같은 값을 나타내며, 그보다 깊은 부분에서는 K값(초기응력의 연직성분에 대한 수평성분의 비)이 대략 0.5~1.0사이의 일정한 분포를 보여주고 있다.

현장암반의 초기응력을 정확하게 계산하기 위해서는 많은 지질조사와 여러 지역의 계측결과를 토대로 유사압축에 대한 현장응력의 데이터베이스를 구축하는 것이 필요하다.

### (2) 굴착후 공동주변의 응력분포

지하 암반내에 공동을 굴착하였을 경우 암반내의 초기응력은 굴착으로 인하여 교란되며 공동주변에 새로운 응력장을 형성하게 된다. 이때 굴착후에 발생하는 공동주변에서의 응력교란은 굴착하고자 하는 공동의 형상과 크기, 지반특성, 굴착전 암반내의 초기응력 상태 등과 밀접한 관련이 있다. 따라서 굴착후 공동주변암반의 응력변화를 파악하기 위해서는 공동의 기하형상과 굴착지반특성에 따른 초기응력장에서의 거동특성과 파악이 필요하다.

암반체를 탄성체로 취급하여 해석하는 경우는 지반상태가 매우 양호한 극경암에서 불연속면의 존재가 뚜렷하게 나타나지 않은 경우에 사용한다. 또한 지반상태가 불량한 암반이거나 암반내에 불연속면이 많이 존재하는 경우라도 암반구조물의 전반적인 거동과 약과 해석영역결정 등을 위해서 해석의 처음 단계로서 사용할 수도 있다.

암반체를 탄성체로 취급하였을 경우 굴착후 공동주변의 응력분포에 관한 이론적 연구는 많은 학자들에 의하여 제시된 바 있다[3,4]. 이들은 초기응력장내에서 적절한 가정을 도입하여 구성된 평형방정식과 적합방정식을 경계조건과 재료의 구성관계를 사용함으로써 여러 형태의 기하형상을 갖는 공동주변의 응력분포를 파악하였다.

지반상태가 매우 양호한 극경암을 제외한 대부분의 암석들은 공동굴착후 공동주변에서 발생한 응력이 암석의 강도보다 크게 되면 암석을 파손시키고 공동주변에 응력의 이완대를 형성하게 된다. 여기서 공동주변에 발생한 응력의 이완대란 굴착후 공동주변암석에 발생한 응력이 탄성한도를 벗어난 영역을 의미하며 이 영역내에서의 응력과 변형 등은 소성이론에 의해서 예측이 가능하다. 소성이론은 지반에 발생한 응력의 항복기준과 항복이후의 응력과 변형의 거동양상 등에 따라 특범칙과 경화법칙이 적용되며 지반특성에 따라 Mohr-Coulomb, Drucker-Prager, Tresca 모델 등과 같은 여러 형태의 소성모델을 사용할 수 있다. 공동의 형상이 원형 등과 같이 비교적 간단한 경우에는 고전적인 Mohr-Coulomb의 항복기준을 사용하여 공동주변에서의 탄소성거동을 이론적으로 예측할 수 있다[5,6]. 그러나 공동의 형상이 복잡하거나 공동주변에 불연속면의 영향이 뚜렷한 경우에는 하중증가에 따른 변위의 거동양상이 매우 복잡하게 된다. 이러한 경우에는 실제 암반의 하중과 변위의 구성관계를 적절한 시험을 통하여 구한후 이를 해석에 반영하는 것이 바람직하다.

## 3. 지하암반공동굴착의 수치모형화

지하암반공동굴착후 공동주위에는 응력의 재분배가 발생하게 된다. 따라서 암반공동의 구조거동은 공동굴착의 순서와 건설방법에 따라 크게 달라질 것이다. 특히 굴착후 공동주위에 항복응력의 발생이 예상되고, Creep 현상과 같이 시간에 따른 응력의 재분배현상이 계속적으로 발생할 것으로 예상되는 지역에서는 공동굴착순서와 건설방법이 공동주변의 거동에 큰 영향을 주는 것으로 발표되고 있다[1]. 따라서 암반공동의 구조해석은 공동굴착에 대한 영향을 반드시 고려하여야 한다.

유한요소법이나 개별요소법과 같은 수치해석법을 사용하여 암반공동의 굴착단계별 해석을 수행하는 방법은 그림 2에 나타난 바와 같다[7]. 즉 초기응력이 가해진 굴착전 상태에서 굴착단면의 경계위치에서 발생하는 응력을 계산하고(그림 2(a)), 이 응력을 굴착경계면에서의 등가절점력으로 환산한 후 이 힘을 굴착후 굴착단면의 경계에 반대의 방향으로 작용시켜서 구조해석을 수행한다(그림 2(b)). 굴착을 여러 단계별로 나누어 실시할 경우에는 경계면에서 구한 등가절점력을 적절한 크기로 배분하고, 배분된 힘을 각 단계별 굴착시의 하중으로 작용시키는 것이 바람직하다. 이 방법은 지반문제에 해석에 널리 사용되고

있는 유한요소법에 의한 전산코드 Mr.Soil[8]과 개별요소법에 의한 전산코드 UDEC[9] 등에서도 널리 사용되고 있다.

#### 4. 굴착영향을 고려한 암반공동의 구조해석

본 연구에서는 지하암반의 굴착으로 인하여 발생하는 공동주변에서의 거동변화를 정량적으로 검토하기 위하여 유한요소모델과 개별요소모델을 사용하여 지하암반공동의 구조해석을 수행하였다.

해석에 고려된 암반동굴은 한국원자력연구소와 스웨덴 SKB가 공동으로 연구한 "중·저준위 방사성폐기물 영구처분시설 개념설정"[10] 보고서에서 제시된 여러 공동형태중에서 가장 큰 단면을 택하였으며, 재료특성은 국내의 현장시험결과[11]를 이용하였다(그림 3참조).

유한요소해석에서는 공동굴착시 굴착방법과 순서, 보강방법과 시기에 따른 거동변화를 파악하였으며, 개별요소해석에서는 공동주변에서의 불연속면이 산재할 경우 굴착순서에 따른 거동변화, 인접공동의 굴착으로 인한 영향 등을 검토하였다.

각 경우의 해석시 해석영역의 크기는 여러 연구결과[12,13]를 토대로 하여 굴착에 따른 공동주변에서의 응력변화를 충분히 나타낼 수 있도록 상하경계를 공동높이의 6배, 좌우경계를 공동폭의 10배정도로 정하였으며, 대상구조물의 대칭성을 고려하여 전체구조물의 1/2만을 모형화하여 해석하였다.

##### (1) 유한요소해석

굴착으로 인한 거동과락을 위하여 유한요소해석시 사용한 모델은 그림 4에 나타낸 바와 같다. 그림 4의 모델에 대하여 해석은 크게 초기과정과 건설과정의 두 경우에 대하여 수행하였으며 초기과정에서 구한 초기응력을 건설과정의 입력하중으로 작용시켰다. 이때 K값은 여수지역에서 측정된 값을 참조하여 1.5를 사용하였으며, 재료의 탄소성모델은 Drucker-Prager의 항복조건을 만족하는 것으로 가정하였다. 또한 공동굴착시 보강재의 재료특성과 배치방법은 울산 Y비축기지에서 사용한 방법[14]을 참조하였으며, Rock Bolt와 Shotcrete에 대해서만 고려하였다.

건설과정에 대한 수치해석은 크게 세 경우에 대하여 수행하였다. 첫번째 해석에서는 두 가지 단면형태로 3단계굴착을 실시할 경우의 각각에 대하여 공동주변에 발생한 거동을 비교하였고, 두번째 해석에서는 공동의 전단면 굴착시 보강유무에 따른 거동변화를 비교하였으며, 세번째 해석에서는 보강시기를 4가지 형태로 달리하였을 경우의 각각에 대한 거동변화를 비교검토하였다.

첫번째 해석시 고려한 3단계굴착의 두가지 단면형태는 그림 5와 같다. 그림 5에서 Type I는 위에서부터 차례로 3단계굴착을 수행하는 경우이고, Type II는 1단계에서는 Type I과 동일하게 굴착하고, 2,3단계에서는 수평방향으로 굴착하는 경우이다. 그림 5의 두 경우에

대한 각각의 구조해석결과 구한 공동주변의 대표적인 몇개점에서의 변위를 표 1에 나타내었다. 표 1에서 Type II(수평 및 수직조합단계굴착)가 Type I(수직단계굴착)보다 변위가 대체적으로 더 크게 발생함을 알 수 있다.

두번째 해석에서는 전단면을 굴착하였을 경우 보강재의 유무에 따른 거동변화를 검토하였다. 해석에 사용한 보강재와 보강방법은 그림 6에 나타낸 바와 같다. 보강유무에 따른 각각의 구조해석으로부터 구한 공동주변의 대표적인 몇개점에서의 변위는 표 2와 같다. 표 2에서 공동주변에서의 변위는 보강재를 설치하였을 경우가 보강을 하지 않았을 경우보다 대략 2.0% 더 작음을 알 수 있다.

또한 굴착의 단계별 영향을 고려한 최종 단계굴착후의 공동주변변위(표 1참조)는 전단면을 한번에 굴착한 경우의 변위(표 2참조)보다 대체적으로 약간 더 작음을 알 수 있다. 따라서 굴착의 단계별영향을 고려하여 해석하는 것이 무시하고 한번에 굴착하는 경우보다 약간 경제적인임을 알 수 있다.

세번째 해석에서는 공동의 Gallery부분(그림 5의 A부분)을 굴착하고 보강을 실시할 경우 보강시기변화에 따른 공동주변에서의 거동을 비교하였다. Gallery부분을 굴착한 후 보강은 그림 7(a)와 같은 방법을 사용하였다.

이때 보강시기는 Gallery부분이 굴착된 후 등가절점력의 이완이 4가지 형태(10%,30%,50%,70%)로 진행된 후의 각 경우에 대해서 검토하였다. 각 경우에 대한 해석결과 구한 공동정점에서의 수직변위변화는 그림 7(b)에 나타내었다. 그림에서 굴착후 보강을 빨리 하면 할수록 변위의 증가를 감소시킬 수 있다.

##### (2) 개별요소해석

개별요소법에 의한 해석은 불연속면이 존재하는 암반내에 그림 3과 같은 한 개의 공동을 굴착한 후 기존 공동으로부터 수평방향으로 20m만큼 떨어진 위치에 또다른 공동을 좌우에 1개씩 추가굴착하였을 경우 굴착순서의 고려 유무에 따른 기존 공동의 거동변화를 검토하기 위하여 수행하였다.

공동주변의 불연속면분포와 특성값은 국내에서 계측된 자료가 부족하여 캐나다 Ontario 주의 Fraser광산주변 불연속면분포[9]를 참조하였다(그림 8참조).

초기응력의 계산과정은 유한요소법의 경우와 동일한 방법을 사용하였고, 암석과 불연속면내에서의 소성응력은 Mohr-Coulomb의 항복기준에 준하는 것으로 가정하였다.

대상구조물은 공동의 굴착전후 모두 좌우대칭이므로 그림 9에 나타낸 바와 같이 전체 구조물의 1/2만을 모형화하였으며, 암석내에서의 변형은 완전변형가능한 블록으로, 불연속면의 거동은 블록과 블록의 변과 변사이의 접촉(Edge-to-Edge Contact)으로 각각 모형화하였다.

그림 9의 해석모델을 사용하여 다음의 두가지 경우에 대한 구조해석을 수행하였다. 첫번째는 중앙의 공동을 굴착하고 좌우측의 공동

을 나중에 굴착하는 경우(그림 9에서 A굴착후 B굴착)를 해석하였고, 두번째는 3개의 공동을 동시에 굴착하는 경우(그림 9에서 A와 B공동 동시굴착)를 해석하였다. 모든 공동은 전단면 동시 굴착되고, 굴착후에는 공동주변의 응력이 즉시 100%이완되는 것으로 가정하였다.

본 연구의 수치해석을 통하여 얻어진 다공동굴착시 굴착순서의 고려유무에 따른 공동주변에서의 변위는 표 3과 그림 10에 나타난 바와 같다. 그림과 표에서 알 수 있듯이 굴착순서의 고려유무에 따른 공동주변에서의 변위형태와 방향은 거의 유사하고 크기만 약간 차이가 발생하였다. 즉 중앙의 공동주변 암반체내에 존재하는 내부에너지가 좌우측공동방향으로 전달됨에 따라 중앙공동주변에서의 최종 변위값은 (c)의 경우가 (a)의 경우보다 전반적으로 조금씩 작게 나타남을 알 수 있다.

또한 표 3으로부터 중앙공동주변에서의 변위는 단일공동만을 굴착하였을 경우가 두개의 공동을 굴착하였을 경우보다 약 1~5% 더 크 발생함을 알 수 있다. 이러한 결과는 공동주변의 불연속면영향을 고려하지 않았을 경우에 대한 해석결과에서도 유사한 경향을 나타내고 있다[15].

#### 5. 결론

본 연구에서는 지하암반공동의 굴착에 따른 공동주변암반에서의 거동변화를 검토하였다. 이를 위하여 굴착전 지하암반내에서의 초기응력과 굴착후 공동주변에서의 응력변화, 공동굴착의 수치모형화방법 등을 검토하였다. 이러한 내용을 토대로 유한요소법과 개별요소법에 의하여 작성된 프로그램을 사용하여 연속체암반공동과 불연속체암반공동의 건설과정에서 발생할 수 있는 여러 경우에 대한 탄소성 해석을 수행하였다. 해석결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 동일한 크기와 형태를 갖는 공동을 3단계로 나누어 굴착할 경우, 최종굴착후에 공동주변에서 발생한 변위와 응력은 단계별 굴착형상에 따라서 서로 다른 분포를 보여준다. 본 예제에서 최종굴착후에 발생된 공동주변의 변위는 수직 및 수평조합단계굴착(Type II)의 경우가 수직단계굴착(Type I)보다 대체적으로 더 크게 발생하였다.
- 2) 전단면굴착후 공동주변에서의 거동은 보강재의 유무에 따라 서로 다른 양상을 보여준다. 본 예제의 경우 공동주변에서의 변위는 보강을 실시하였을 경우가 실시하지 않았을 경우보다 약 2% 더 작게 발생하였고, 응력의 이완영역도 더 작게 형성되어 공동의 안전성에 보강재의 역할이 큰 것으로 나타났다.
- 3) 동일한 방법 및 형태에 따라 보강을 실시한다 하더라도 그 시기에 따라 상당한 차이를 보여주었다. 즉 보강시기가 빠른 경우(Case I)가 늦은 경우(Case IV)에 비해 공동주변의 변위는 작게 나타났으며, 보강재인 Rock Bolt에 걸리는 축력은 2~10배, Shotcrete의 전단력 및 모멘트는 2~5배 크게 발생되었다. 따라서 보강시기가 빠를수록 보강재가 부담하는 힘이 커져서 공동의 안전성은 그만큼 확보된다.

4) 공동주변에서의 변위는 굴착의 단계별 영향을 무시하고 해석하였을 경우가 단계별 영향을 고려하였을 때 보다 대체적으로 크다. 따라서 대단면굴착일 경우 굴착의 단계별 영향을 고려하여 해석하는 것이 무시할 경우보다 더 경제적임을 알 수 있다.

5) 동일한 형태와 크기를 갖는 공동을 여러개 굴착할 경우 공동주변에서의 변위와 응력은 굴착순서에 따라 달라진다. 본 예제의 경우 굴착순서를 고려하였을 경우가 무시하였을 경우보다 공동주변에서의 변위는 약간 더 작고, 응력은 더 크게 나타났다. 따라서 다공동에 대한 구조해석시 보다 정확한 구조해석을 위해서는 굴착순서의 영향을 고려하여 해석하는 것이 바람직하다.

이상에서 검토한 바와 같이 굴착으로 인한 암반공동의 거동은 굴착하고자 하는 단계별 단면형상과 굴착순서, 그리고 보강방법과 보강순서 등에 따라 달라지게 된다. 따라서 지하암반공동의 보다 안전하고 경제적인 설계 및 건설을 위해서는 정확한 지질조사로부터 대상암반체에 대한 초기응력과 불연속면 분포 등 지반특성을 파악하고 굴착의 영향을 고려하여 해석한 후에 적절한 굴착단계, 굴착순서, 굴착순서 그리고 보강방법과 시기 등을 선정하여야 할 것이다.

#### 참고문헌

1. J. Chaboussi and R.E. Ranken, "Tunnel Design Considerations; Analysis of Medium - Support Interaction," Report No UIUL - ENG 74-2032, Univ. of Illinois, Urbana, 1974.
2. K.G. Stagg and O.C. Zienkiewicz, Rock Mechanics in Engineering Problems, 3rd ed., John Wiley and Sons Press, New York, 1974.
3. L. Obert and W.I. Duvall, Rock Mechanics and the Design of Structures in Rock, John Wiley and Sons Press, New York, 1967.
4. M. Greenspan, "Effect of a Small Hole on the Stresses in a Uniformly Loaded Plate," Quarterly Applied Mathematics, Vol.2, pp.60~71, 1944.
5. J.W. Bray, "A Study of Jointed and Fractured Rock - Part II: Theory of Limiting Equilibrium," Rock Mechanics and Engineering Geology, Vol. V, No. 4, pp.197~216, 1967.
6. H.D. Fara and F.D. Wright, "Plastic and Elastic Stresses around a Circular Shaft in a Hydrostatic Stress Field," Trans. AIME, Vol.226, pp.319~320, 1963.
7. J.V. Lemos, "A Distinct Element Model for Dynamic Analysis of Jointed Rock with Application to Dam Foundation and Fault Motion," Ph.D. Dissertation, Univ. of Minnesota, 1987.
8. Century Research Center, MR.SOIL User's Manual, Japan, 1988.

9. M. Board, "UDEC (Universal Distinct Element Code) Version ICC 1.5," Itasca Consulting Group, Inc., NUREC/CR-5429, Vol.1, 1989.
10. 한국원자력연구소 부설 원자력 제2연구소, "중.저준위 방사성폐기물 영구처분시설 개념설계," KAERI II/RR-4/90, 과학기술처, 1990.
11. 윤건신, 최영철, "UDEC 프로그램을 이용한 한국의 방사성폐기물처분장설계연구," KOPEC/90-T-032, 한국전력기술주식회사, 1990.
12. 한국원자력연구소, "불연속면의 영향을 고려한 암반동굴의 구조거동연구," KAERI/RR-897/89/ST, 과학기술처, 1989.
13. 한국원자력연구소, "불연속면의 영향을 고려한 암반동굴의 동적구조거동연구," KAERI II/RR-5/90, 과학기술처, 1990.
14. (주)유공, "Y비축기지 사업보고서," 1988.
15. 한국원자력연구소, "굴착영향을 고려한 지하공동의 거동연구," KAERI-NEMAC/RR-43/91, 과학기술처, 1991.

표 1. 3단계 굴착의 두가지 형태에 대한 굴착후 공동주변의 변위 ( $\times 10^{-4}$  m)

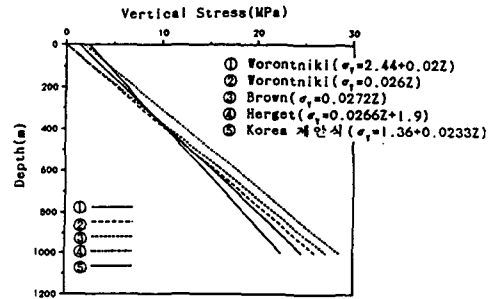
	Type I	Type II	
수직변위			
A	-20.35	-20.39	
B	21.28	20.77	
수평변위			
C	-28.81	-29.06	
D	-28.81	-29.14	

표 2. 전단면굴착시 보강유무에 따른 공동주변의 변위 ( $\times 10^{-4}$  m)

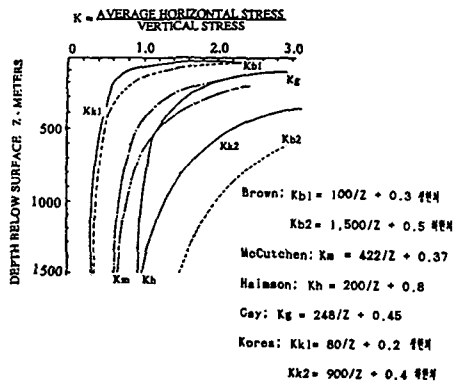
	보강 무	보강 유	
수직변위			
A	-20.57	-20.31	
B	21.51	21.29	
수평변위			
C	-29.01	-28.89	

표 3. 굴착순서에 따른 공동주변에서의 변위 ( $\times 10^{-4}$  m)

	A 굴착	A굴착 후 B굴착	A, B 동시굴착
수직변위			
a	-65.3	-62.6	-63.4
b	-8.3	-7.7	-7.8
c	-15.2	-15.0	-15.1
e	37.4	35.1	35.7
수평변위			
b	-20.4	-19.1	-19.4
c	-110.8	-106.1	-107.4

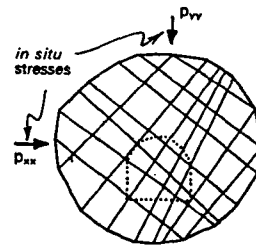


(a) 연직성분

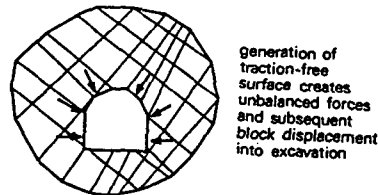


(b) 수평성분

그림 1. 초기응력 분포



(a) Pre-excavation State



(b) Immediately after Excavation

그림 2. 공동굴착의 수치모형화 방법

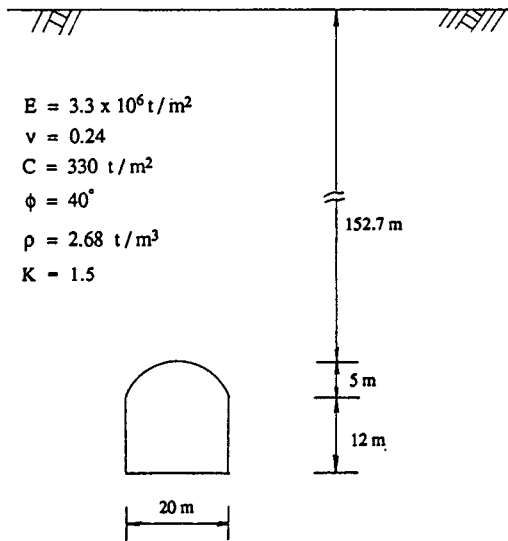


그림 3. 해석에 고려된 지하공동

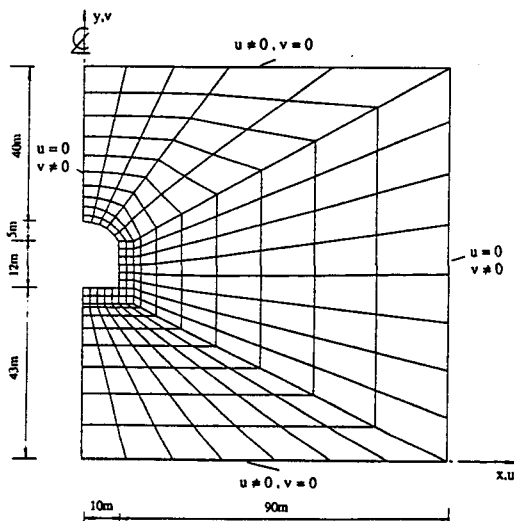


그림 4. 지하공동의 유한요소 해석모델

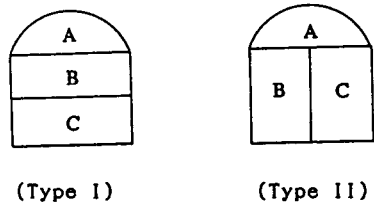


그림 5. 3단계 굴착의 두가지 단면형태

◆ 보강재의 재료특성

	Rock Bolt	Shotcrete
$E (x 10^6 \text{ t/m}^2)$	21.10	3.00
$A (x 10^{-4} \text{ m}^2)$	4.91	1100.00
$W/l (x 10^{-3} \text{ t/m})$	3.54	231.00
$I_0 (x 10^{-4} \text{ m}^4)$	-	111.00

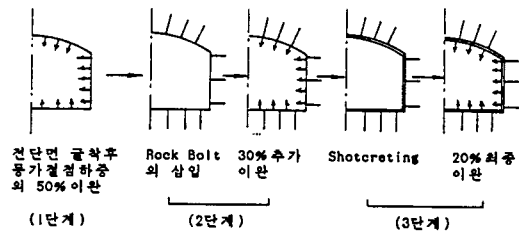
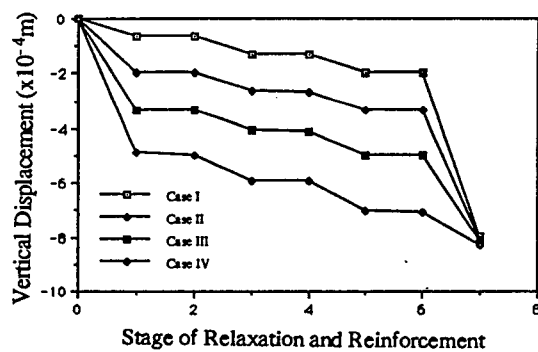
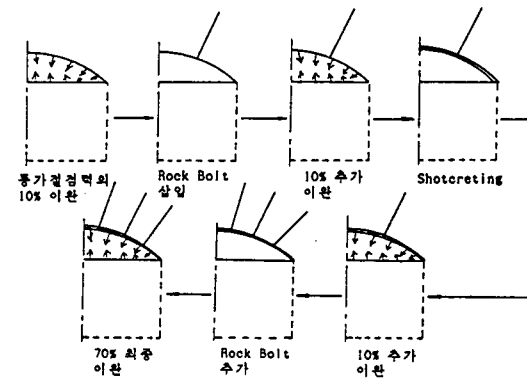


그림 6. 전단면 굴착시 보강절차



(b) 보강시기에 따른 공동정점에서의 수직변위 변화

그림 7. 1단계 굴착후 보강시기 변화에 따른 공동정점에서의 변위 변화

◆ 불연속면의 재료특성

$jk_s(t/m^2)$	$jk_n(t/m^2)$	$jc(t/m^2)$	$j\phi(^{\circ})$
50,000	50,000	256	27.0

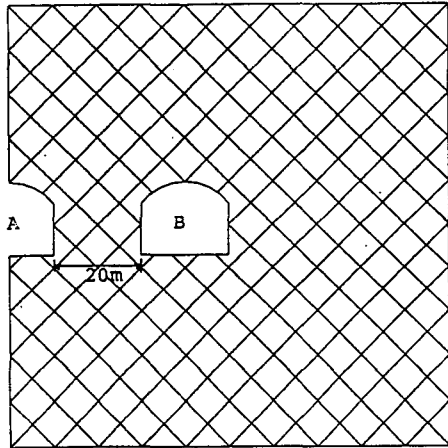


그림 8. 다공동주변의 불연속면 분포

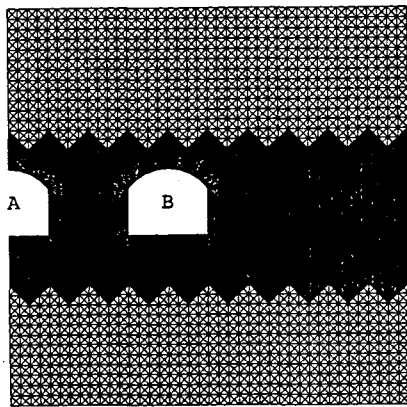
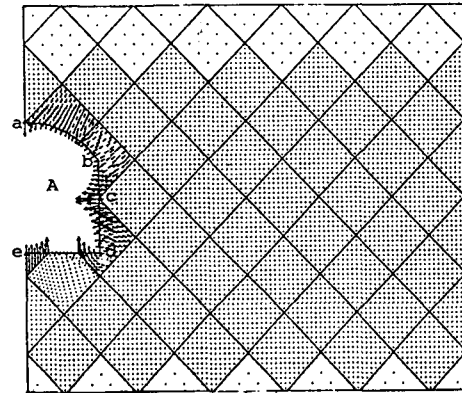
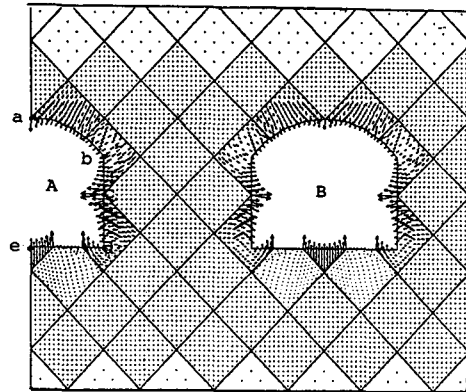


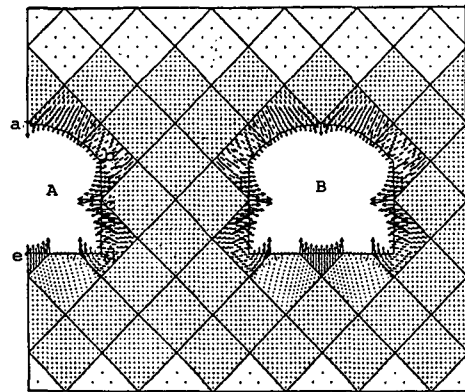
그림 9. 다공동 해석모델



(a) 중앙의 A공동만 굴착하였을 경우



(b) A공동굴착후 B공동을 굴착하였을 경우



(c) A와 B공동을 동시에 굴착하였을 경우

그림 10. 다공동굴착후 공동주변에서의 변위벡터